

**Matěj PETRUŽÁLEK¹, Tomáš LOKAJÍČEK², Vladimír RUDAJEV³,
Jan VILHELM⁴**

**LOKALIZACE JEVŮ AKUSTICKÉ EMISE V ANIZOTROPNÍM PROSTŘEDÍ
LOCALIZATION OF ACOUSTIC EMISSION IN ANISOTROPIC VELOCITY FIELD**

Abstract

The questions of influence of a velocity model and accuracy of P-wave first arrival times on the seismoacoustic events foci localization are analyzed. It was found out that the velocity model can be approximated by a triaxial ellipsoid. Current velocity ellipsoid results from measured ultrasonic sounding data. The accuracy of automatic picking of P-wave first arrivals performed by Vallen software and by method of moment picker is discussed. New localization approaches were tested and applied for testing on migmatite samples.

Key words: Seismoacoustic event, location of event, velocity model

Úvod

Výzkum akustické emise (AE) vznikající při zatěžování hornin je nejen ve světě, ale i u nás prováděn již po řadu desetiletí. Souhrnný přehled využití akustické emise pro studium procesu porušování hornin podává například Lockner (1993). Současné sofistikované monitorovací aparatury však umožňují identifikovat seismoakustické impulzy v širokém frekvenčním i amplitudovém rozsahu s časovým rozlišením řádově mikrosekund. Právě detailní časové údaje o příchodu seismoakustických vln na síť snímačů umožňují lokalizaci mikroporušení v horninových vzorcích, která jsou ohnisky vyzářených elastických vln o akustických a ultrazvukových frekvencích. Analýza rozložení ohnisek impulsů AE a jejich migrace během zatěžování horninových vzorků svědčí o průběhu porušování horniny a je i důležitým údajem pro odhad budoucího totálního rozrušení vzorku.

Metody lokalizace ohnisek dějů AE vycházejí zejména z metod používaných v seismologii pro nalezení hypocenter zemětřesení. V průběhu zatěžovacích experimentů bývá zaznamenáno velké množství jevů AE (až desítky tisíc), které je možno lokalizovat. Z důvodu jejich vysokého počtu je nutné proces lokalizace provádět automaticky.

V tomto příspěvku budou diskutovány otázky přesnosti lokalizačních metod a uvedeny příklady na laboratorně testovaných vzorcích migmatitu z lokality Skalka. Přitom bude testována i metodika automatických odečtů časů prvních nasazení.

Metodika zpracování dat

Pro určování polohy ohniska zemětřesení existuje celá řada metod, které vycházejí z různých principů. Při laboratorním výzkumu porušování horninových vzorků

¹ Přírodovědecká fakulta University Karlovy v Praze, Geologický ústav AV ČR, v.v.i., Praha

² Ing., CSc., Geologický ústav AV ČR, v.v.i., Praha, tl@gli.cas.cz

³ RNDr., DrSc., Geologický ústav AV ČR, v.v.i., Praha, rudajev@gli.cas.cz

⁴ Doc., RNDr., CSc., Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, Geologický ústav AV ČR, v.v.i., Praha, vilhelm@natur.cuni.cz

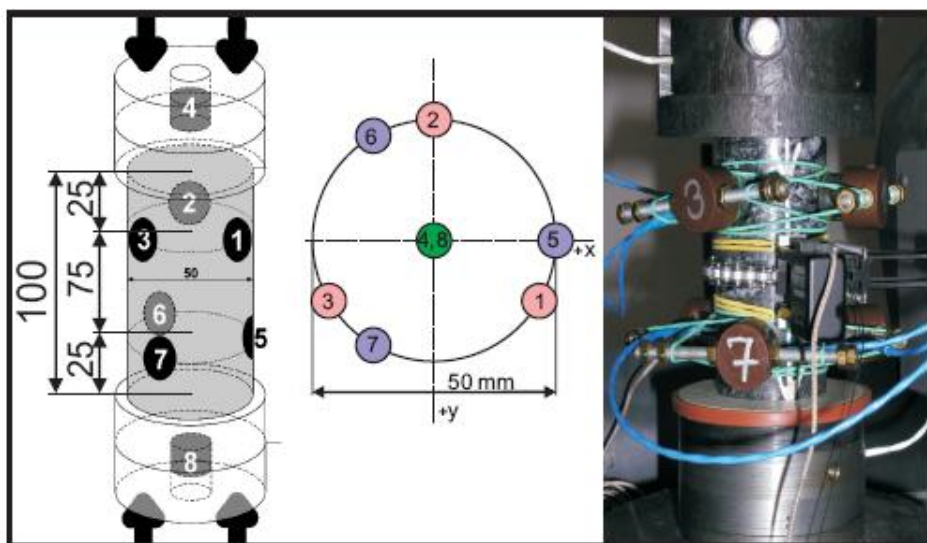
se používají často jednodušší algoritmy založené na využití časů příchodu vln v prvním nasazení (AE: downhill simplex algoritmus Nelder a Mead (1965) nebo Press at al (1987), Gaussian iterační algoritmus podle Locknera (1992), nebo modified Gaussian - Zang et. al, (1996)). Zásadním měřeným parametrem vstupujícím do lokalizačních algoritmů jsou časy příchodu jednotlivých vlnových fází ke snímačům tvořícím měřicí síť. Ze známé geometrie snímačů a rychlostního modelu jsou vypočteny souřadnice ohniska akustické emise. Jedním z algoritmů, který lze pro lokalizaci použít je grid search algoritmus. Jeho výhodou je možnost poměrně snadného přizpůsobení tohoto algoritmu i složitějšímu rychlostnímu modelu prostředí ve vzorku.

Přesnost lokalizace ovlivňují především tyto faktory: rozmištění registrační sítě snímačů, dostupnost jednotlivých fází, přesnost odečtů časů příchodu P vln na jednotlivé snímače a vhodnost rychlostního modelu. V laboratorních podmínkách je vlnový obraz tvořený složitou interferenční vlnou a například příchod S-vlny je prakticky nemožné identifikovat (jednosložkové snímače, omezené rozměry vzorku), proto se pro lokalizaci využívá jen prvního nasazení P-vln. Pro dosažení co nejvyšší přesnosti lokalizace je nezbytné určit časy příchodu co nej přesněji. Z důvodu velkého množství lokalizovaných jevů není možné provádět odečty nasazení ručně, ale je nutné použít nějaký automatický odečítač časů příchodu (picker). Automatickými odečty časů se zabývali například Lokajíček a Klíma (2006), Leonard a Kinnert (1999).

Pro lokalizaci AE se běžně používá isotropaní rychlostní model, kdy je konstantní rychlost šíření elastických vln určena na základě ultrazvukového prozařování. Pokud v průběhu zatěžovacího experimentu probíhá ultrazvukové prozařování, je možné na jeho základě hodnotu rychlosti upřesňovat podle toho, jak vzorek reaguje na působící napětí. Vlivem přednostní orientace minerálů, jednotlivých zrn, orientace pórového prostoru nebo systémů mikrotrhlin se horniny projevují různým stupněm anizotropie rychlosti, který je rovněž závislý na napětíových podmínkách. V některých horninách tak dosahuje anizotropie takových hodnot, že použití isotropaního modelu s konstantní rychlostí je pro lokalizaci jevů AE nevhodné. I u hornin původně isotropaních, jako jsou např. granity nebo basalty, dochází někdy vlivem zatěžování k vývoji výrazné rychlostní anizotropie (Stanchits et. al.,2006).

Experimentální vybavení

Pro měření akustické emise na vzorcích hornin je využívána síť osmi širokopásmových piezokeramických snímačů WD (firmy PAC, USA). Rozložení těchto snímačů na vzorku zachycuje obrázek 1. Standardní vzorek je válcový, o výšce 100 mm a průměru 50 mm.



Obr. 1 Uspořádání snímačů při jednoosém zatěžování válcových vzorků.

Registrované elastické vlnění je piezokeramickými snímači přeměněno na elektrický signál. Ten je po zesílení registrován pomocí aparatury Vallen, která v dané konfiguraci umožňuje osmikanálovou registraci vlnových obrazů dějů AE s rozlišením 16 bitů. Využívána je spouštěná registrace, založená na překročení prahové úrovně na jednom z kanálů. Záznam každého kanálu představuje signál o délce 2048 vzorků, z toho je 512 bodů před spuštěním (u spouštěcího kanálu). Vzorkovací frekvenci je 10 MHz, což odpovídá kroku vzorkování 0,1 mikrosekundy.

Kromě záznamu vlnových obrazů umožňuje aparatura Vallen rovněž automatické online zpracování signálů AE. Pokud na některém kanálu dojde k překročení prahové úrovně je odečten absolutní čas příchodu a proběhne určení dalších parametrů AE (energie, maximální amplituda, délka trvání, úroveň šumu a další). Propojení těchto automaticky určených dat a zaznamenaných vlnových obrazů umožňuje společné indexování.

Pomocí aparatury Vallen v kombinaci se sítí snímačů je také realizováno ultrazvukové prozařování v průběhu zatěžování. Prozařování se využívá pro určení rychlosti elastických vln ve vzorku a dále ke stanovení velikosti a orientace rychlostní anizotropie. Anizotropii je v řadě případů možné vyjádřit rychlostním elipsoidem (Petružálek et al, 2007).

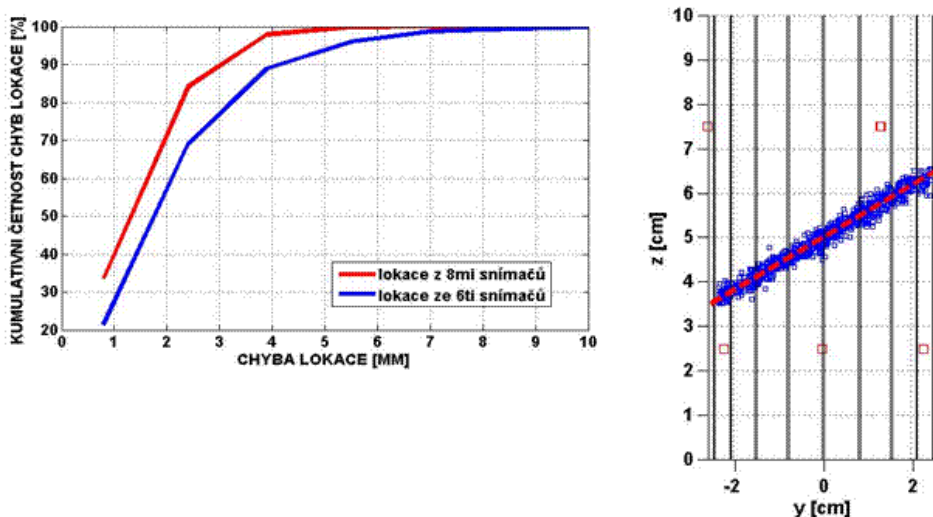
Horninový materiál

Laboratorní experimenty byly provedeny na vzorcích migmatitu, odebraného z lokality Skalka. Tento materiál se projevuje výraznou, makroskopicky viditelnou, plošně-paralelní strukturou. Rychlostní anizotropie a její závislost na struktuře migmatitu byla stanovena metodou ultrazvukového prozařování kulového vzorku ve 132 nezávislých směrech (Pros et al, 1998). Bylo zjištěno (Petružálek et al, 2007), že minimální rychlost je orientována kolmo k foliaci a za atmosférického tlaku

má hodnotu 3 km/s. Směr maximální rychlosti leží v rovině foliace a maximální rychlost dosahuje až 6 km/s.

Lokalizace s použitím anizotropního rychlostního modelu

Z velikosti anizotropie, zjištěné prozařováním kulového vzorku vyplývá, že pro lokalizaci není vhodné v daném případě použít izotropní rychlostní model s konstantní hodnotou rychlosti. Jako rychlostní model pro lokalizaci dějů AE v průběhu jednoosého zatěžování válcového vzorku byl proto zvolen anizotropní model určený trojosým rychlostním elipsoidem, získaný aproximací dat ultrazvukového prozařování v průběhu zatěžovacího experimentu (Petružálek et al, 2007).



Obr. 2 Vliv rychlostního modelu na přesnost lokalizace

Testování vlastností trojosého elipsoidu jako rychlostního modelu pro lokalizaci AE bylo provedeno pomocí modelového výpočtu. K tomu účelu byla zvolena modelová rovina porušení procházející středem vzorku se sklonem 30° od horizontální roviny. V této rovině bylo pomocí pravidelné sítě určeno 1000 uzlových bodů. Každý z těchto bodů se v modelovém výpočtu stal zdrojem seismického vlnění. S pomocí anizotropního rychlostního modelu, vycházejícího z rychlostního elipsoidu, bylo vypočteno 8 časů průchodu vlnění od zdroje v modelové rovině porušení ke každému z osmi snímačů na povrchu vzorku. Pro testování vlivu chyb v určení času příchodu byly takto stanovené časy zatíženy chybou. Tato chyba měla normální rozdělení a střední hodnotou 500 m/s. Hodnota 500 m/s byla stanovena na základě odhadu přesnosti aproximačního rychlostního elipsoidu pomocí RMS chyby. Lokalizace byla provedena metodou grid search, objem vzorku byl rozdělen pravidelnou trojrozměrnou sítí s krokem $dx=dy=dz=0.1$ mm.

Pro stanovení polohy ohniska AE děje v obecném případě postačují čtyři známé časy příchodů vlnění do čtyř snímačů. Pokud máme k dispozici více snímačů a více časů příchodu, lze problém lokalizace ohniska řešit optimalizací. V konkrétním případě byla k dispozici síť osmi snímačů, a tak bylo možné lokalizovat s optimalizací, a to i v případě vypuštění například dvou časů příchodů, které byly zatíženy největší chybou.

Odstranění časů zatížených největší chybou může vést ke zpřesnění určení polohy ohniska. To bylo rovněž ověřováno modelovým výpočtem.

Obrázek 2 (vpravo) zachycuje rozložení ohnisek po zpětné lokalizaci. Z obrázku 2 (vlevo) vyplývá, že vlivem rychlostního modelu dochází při lokalizaci z osmi časů k nepřesnosti do 3 mm v 90% bodů modelové roviny. Při lokalizaci ze šesti snímačů je vlivem přibližně stejnoměrného rozložení chyby na všech osmi snímačích přesnost výrazně nižší.

Vliv přesnosti odečtů na chybu lokalizace

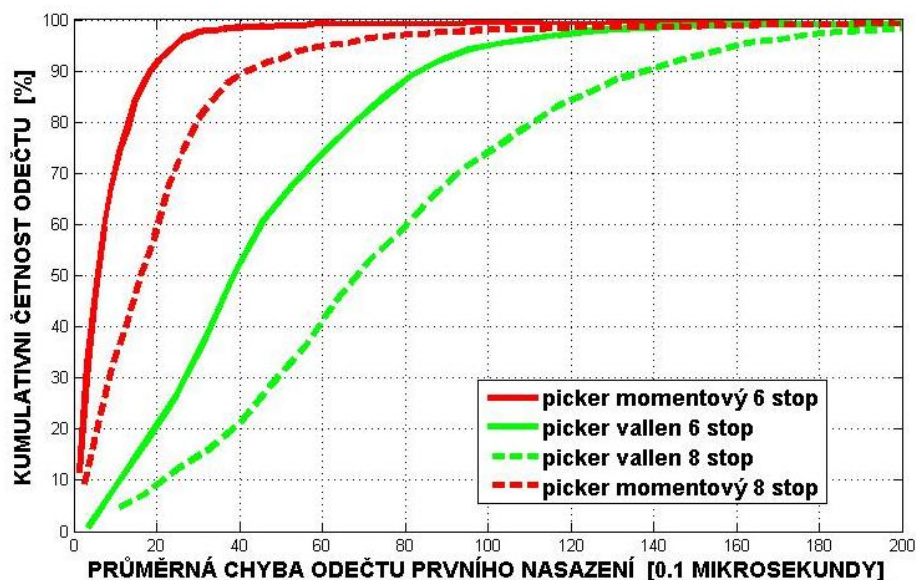
Chyba lokalizace jevů akustické emise závisí podstatným způsobem na přesnosti automatických odečtů prvního nasazení P-vln. Automatické odečty, které můžeme v současnosti využít pro lokalizaci, jsou dvojího druhu:

- odečty aparatury Vallen
- odečty momentového pickeru.

Registrační aparatura Vallen provádí automatické odečty na základě překročení trojnásobku střední úrovně šumu.

Odečty pomocí momentového pickeru jsou založené na výpočtu vyšších statistických momentů (Lokajíček a Klíma, 2006).

Pro testování přesnosti automatických odečtů bylo manuálně odečteno 1000 jevů AE. Rozdíly časů mezi automatickými a manuálními odečty jsou zachyceny na obrázku 3, kde chyba odečtu představuje aritmetický průměr osmi nebo šesti rozdílů pro každý testovaný jev.



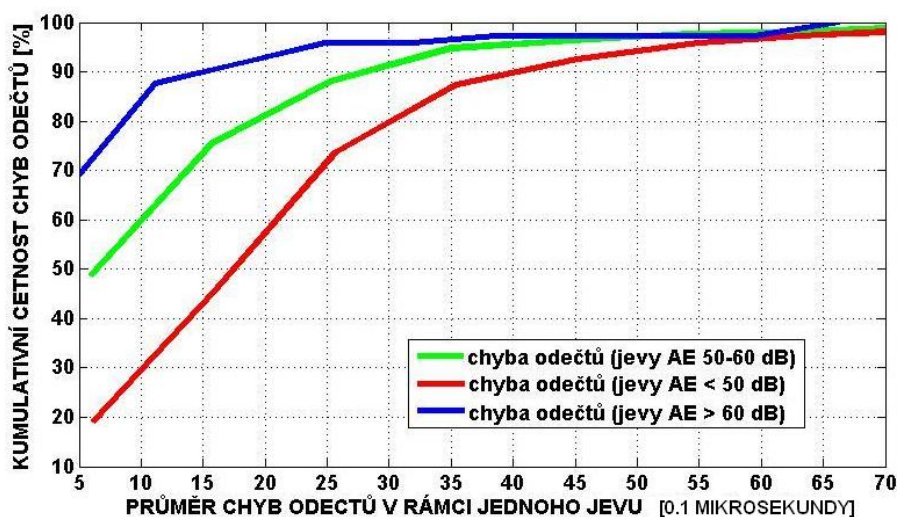
Obr. 3 Přesnost automatických odečtů

Z obrázku 3 jasně vyplývá vyšší přesnost časů určených pomocí automatických momentových odečtů v porovnání s odečty pomocí software Vallen. Další rozbor se proto zaměřil jen na analýzu přesnosti momentového pickeru.

Při využívání časů odečtů zjištěných pomocí automatických procedur lze uvažovat o tom, že všechny časy příchodu nejsou stanoveny se stejnou chybou. Bylo

zjištěno, že často u jednoho děje AE mohou být některé odečty zatíženy větší chybou, než ostatní. Obrázek 3 ukazuje významný rozdíl v průměrné chybě odečtu, když je tato chyba počítána ze všech osmi nebo jen z šesti nejpřesnějších časů. V takovémto případě by jevy AE mohly být přesněji lokalizovány, pokud by nejméně přesně odečtené časy příchodu byly z procesu lokalizace vyloučeny.

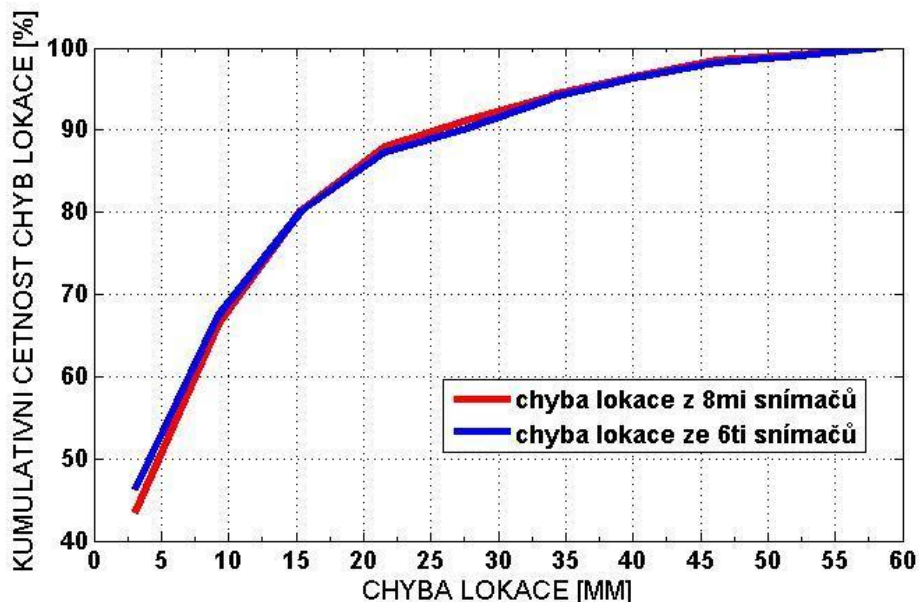
Obrázek 4 znázorňuje přesnost momentových odečtů v závislosti na průměrné maximální amplitudě jevu. Chybou odečtu je opět míněn průměrný rozdíl mezi ručními a momentovými odečty (jeden jev, 8 odečtů). Velikost amplitudy v dB je vztažena k úrovni $LSB = 1\mu V$. Registrované jevy mají amplitudy od 40 do 100 dB, přičemž množství jevů v závislosti na velikosti amplitudy logaritmicky ubývá. Z obrázku 4 vyplývá, že výrazně přesněji jsou automatickým procesem odečítány časy příchodu jevů s průměrnou amplitudou větší než 60 dB. Průměrná chyba 70% těchto jevů je 0.5 mikrosekundy, což odpovídá posunu o pět vzorků signálu.



Obr. 4 Přesnost automatických momentových odečtů v závislosti na amplitudě jevu

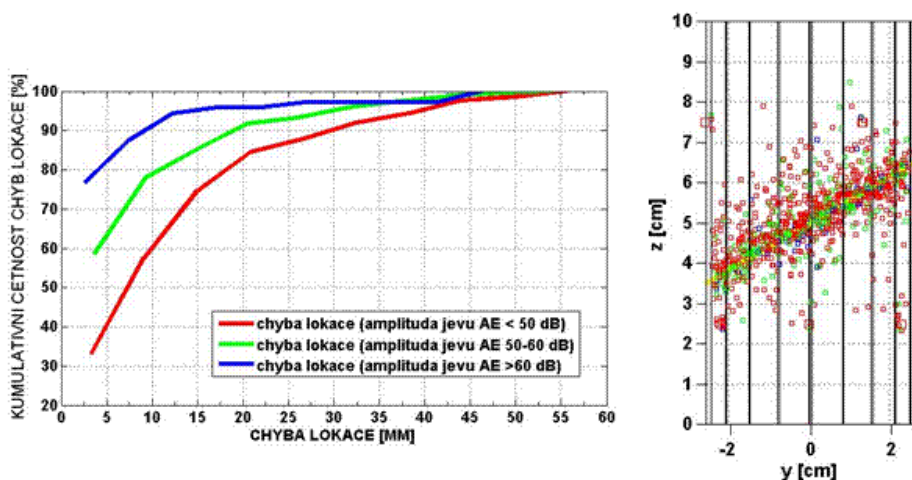
Testování vlivu přesnosti momentových automatických odečtů bylo provedeno modelovým výpočtem v rychlostním prostředí popsaném trojosým rychlostním elipsoidem v objemu odpovídajícím velikosti vzorku. V tomto objemu byla zvolena testovací rovina procházející středem vzorku se sklonem 30° od horizontální roviny. Testovací rovina byla v objemu vzorku rozdělena pravidelnou sítí na 1000 bodů, pro které byly podle rychlostního elipsoidu a rozložení snímačů vypočteny časy průchodu vzorkem. K těmto časům byly přičteny skutečně naměřené časové rozdíly mezi manuálně a automaticky odečtenými časy příchodu pro tisíc jevů AE. Z takto zašuměných časů byla zpětně provedena lokalizace metodou grid search ($dx=dy=dz=0.1$ mm). Lokalizace byla provedena jak ze všech osmi časů, tak i ze šesti nevhodnějších časů. Lokalizace ze šesti časů je realizována následujícím způsobem. Nejprve provedeme lokaci ze všech m (osmi) snímačů, které jsou k dispozici. Pro takto určené ohnisko zjistíme, která skupina $m-1$ snímačů dává nejmenší sumu kvadrátů odchylek časů naměřených a časů odpovídajících spočtené poloze ohniska. Z těchto $m-1$ snímačů pak spočítáme skutečnou lokaci. Tento postup je opakován dvakrát a postupně jsou

odstraněny dva snímače, které v tomto smyslu působí největší chybu. Na obrázku 5 je znázorněna chyba lokace z osmi a ze šesti snímačů.



Obr. 5 Vliv počtu snímačů na přesnost lokace z automatických momentových odečtů

Pokud by odečty na všech osmi snímačích pro lokalizovaný jev měly zhruba stejnou chybu, pak by lokalizace z osmi časů byla přesnější než lokalizace ze šesti časů, jak je vidět na obrázku 2b. Na obrázku 5 je však vidět, že lokalizace z osmi i šesti snímačů je přibližně stejně přesná. To by mohlo ukazovat, že lokalizace ze šesti snímačů je přesnější pro ty jevy AE, které mají výraznou nepřesnost v několika odečtených časech příchodu. K významnému zpřesnění lokace by potom měla vést lokalizace jevů z maximálního možného počtu dobře odečtených časů příchodu osmi, sedmi či případně šesti. Kritériem pro případné vyřazení nevhodného času z procesu lokalizace by mohla být velikost poklesu sumy kvadrátů odchylek časů naměřených a časů odpovídajících spočtené poloze ohniska. Vzhledem k tomu, že časy vypočtené pro modelovou rovinu byly zašuměny skutečně naměřenými chybami odečtů, můžeme přesnost lokace vztáhnout k průměrné maximální amplitudě jevu.



Obr. 6 Přesnost lokace z automatických momentových odečtů v závislosti na amplitudě jevu

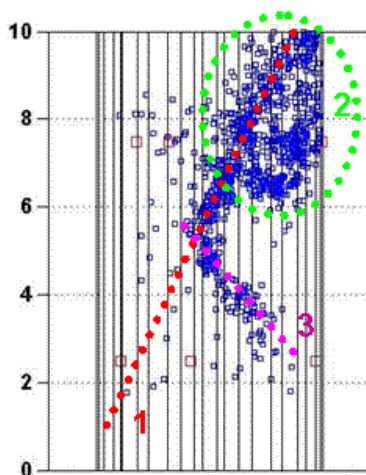
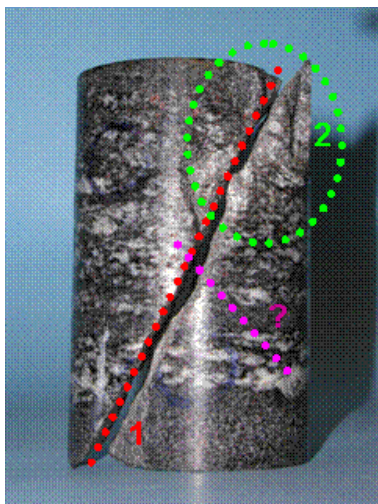
Obrázek 6 (vpravo) zachycuje rozložení modelových jevů kolem testovací roviny v závislosti na průměrné maximální amplitudě jevu. Kvantitativně je tato závislost znázorněna na obrázku 6 (vpravo), ze kterého vyplývá, že nejpřesněji lokalizované jevy jsou ty, které mají průměrnou maximální amplitudu větší než 60 dB. U 75% těchto lokalizovaných jevů způsobuje nepřesnost automatického momentového odečtu (do 0,5 mikrosekundy – viz obr. 2 vlevo) chybu lokace do 2.5 mm.

Korelace vybraných jevů AE s porušením testovaného vzorku

V předchozí části byl na základě modelových výpočtů zjištěn vliv nepřesnosti rychlostního modelu a nepřesností odečtů prvního nasazení na lokalizaci jevů AE. Rychlostní model způsobuje u 70% jevů chybu lokalizace do 2 mm. Pro 75% jevů s průměrnou maximální amplitudou větší než 60 dB je chyba lokalizace způsobená vlivem nepřesnosti automatických momentových odečtů do 2.5 mm. Pokud tedy budeme lokalizovat jevy s větší průměrnou maximální amplitudou než 60 dB, neměla by chyba lokalizace způsobená společným vlivem rychlostního modelu a nepřesností odečtů u většiny jevů přesáhnout 5 mm.

Pro ověření modelových výpočtů byla provedena lokalizace vybraných jevů AE s amplitudou větší než 60 dB. Tyto jevy byly vybrány z jevů v oblasti po překročení 90% meze pevnosti, kde by měla být výrazná korelace prostorového rozložení jevů AE a oblastí porušení testovaného vzorku migmatitu (Obr. 7).

Na obrázku 7 je fotografie porušeného vzorku migmatitu spolu s vyobrazením tisíce výše popsaných lokalizovaných jevů AE a znázorněnými oblastmi porušení vzorku. Konečná rovina porušení označená číslem 1 ve své horní části velmi dobře koreluje s podstatnou částí lokalizovaných jevů AE. Oblast největšího makroskopicky viditelného porušení vzorku je označená číslem 2 a tvarem i velikostí odpovídá významnému shluku jevů AE. Shluk jevů AE označený číslem 3 se makroskopicky viditelným porušením na vzorku neprojevil.



Obr. 7 Korelace prostorového rozložení vybraných jevů AE s porušením testovaného vzorku

Závěr

Trojosý elipsoid se prokázal jako vhodný rychlostní model pro lokalizaci jevů v anisotropním prostředí. Chyba lokalizace způsobená nepřesností rychlostního modelu pro provedené experimenty nepřesahuje u 70% jevů 2 mm.

Pro lokalizaci jevů AE je vhodnější použít momentové automatické odečty než automatické odečty aparatury Vallen.

Pomocí automatických momentových odečtů lze docílit lokalizaci ohnisek s přesností do 2,5 mm u 75 % jevů s průměrnou maximální amplitudou větší než 60 dB.

Lokalizace jevů odečtených momentovým pickerem z osmi nebo šesti snímačů je přibližně stejně přesná. Ke zvýšení přesnosti lokalizace by mohlo vést využití maximálního možného počtu správně odečtených časů příchodu.

Předpoklady, zjištěné na základě modelových výpočtů, byly ověřeny srovnáním polohy oblastí makroskopicky viditelného porušení a lokalizovaných jevů AE.

Poděkování

Tato práce vznikla za finanční podpory projektu GAČR číslo 205/06/0906, projektu GAUK č. 47007 a výzkumných záměrů Přírodovědecké fakulty UK č. MSM0021620855 a Geologického ústavu AV ČR v.v.i. č. AVOZ 30130516. Speciální poděkování patří technikům Laboratoře fyzikálně-mechanických vlastností hornin Z. Erdingerovi, V. Fillerovi a J. Strakové za přípravu vzorků a realizaci experimentálních měření.

Literatura

- [1] Leonard, M. and Kennett, B.L.N. (1999): Multi-component autoregressive techniques for the analysis of seismograms, Phys. Earth Planet. Int. 113(1–4), 247.
- [2] Lockner, D.A., Byerlee, J.D., Kuksenko, V., Ponomarev, A. and Sidorin, A.(1992): Observations of quasistatic fault growth from acoustic emissions, in

- Fault Mechanics & transport Properties of Rocks, pp. 3-31, eds Evans B. & Wong T.-F., Academic Press, London.
- [3] Lockner, D.A. (1993): The role of acoustic emission in the study of rock fracture, *Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Geomech. Abstr.*, 30, 883-899.
 - [4] Lokajíček, T. and Klíma, K. (2006): A first arrival identification system of acoustic emission (AE) signals by means of a high-order statistics approach, *Meas. Sci. Technol.*, 17, 2461-2466.
 - [5] Nelder, J. and Mead, R. (1965): A Simplex method for function minimization, *Computer J.* 7, 308–312.
 - [6] Petružálek, M., Vilhelm, J., Lokajíček, T. and Rudajev, V. (2007): Assessment of P-wave anisotropy by means of velocity ellipsoid, *Acta Geodynam. Geomater.* Vol. 4, No. 3 (147), pp. 23-31.
 - [7] Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S. and Vetterling, W.T. (1987): *Numerical Recipes*, Cambridge University Press, Cambridge.
 - [8] Pros, Z., Lokajíček, T. and Klíma, K. (1998): Laboratory study of elastic anisotropy on rock symplect, *Pure Appl. Geophys.*, 151, 619–629.
 - [9] Stanchits, S., Vinciguerra, S. and Dresen, G. (2006): Ultrasonic velocities, acoustic emission characteristics and crack damage of basalt and granite, *Pure Appl. Geophys.* 163, 974–993.
 - [10] Zang, A., Wagner, F.C. and Dresen, G. (1996): Acoustic emission, microstructure and damage model of dry and wet sandstone stressed to failure, *J. Geophys. Res.*, 101, 17507-17521.